

Atuadores

Aula 02 - Máquinas Elétricas: Máquinas de Corrente Contínua



Apresentação

Nesta aula, estudaremos as máquinas de corrente contínua, que são equipamentos utilizados em aplicação de conversão eletromecânica de energia. Iniciaremos com uma breve explanação sobre as suas partes físicas. Em seguida, estudaremos o princípio de funcionamento desses motores de corrente contínua (motores CC) e o modo como interconectar as suas partes para que eles funcionem corretamente. Para finalizar, apresentamos alguns equacionamentos, como o torque, a tensão na armadura para obtermos a força e a velocidade necessária ao seu funcionamento.



Objetivos

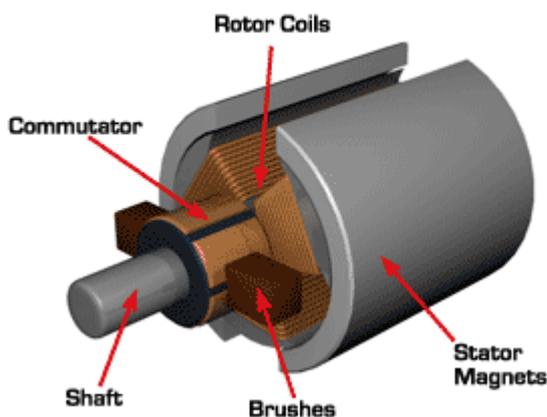
- Descrever as características físicas de um motor de corrente contínua.
- Descrever o princípio de funcionamento dos motores CC.
- Estabelecer as diferentes formas de ligação e as características de funcionamento do motor CC.
- Calcular a tensão aplicada à armadura para variação da velocidade.
- Calcular o torque de uma máquina CC.
- Reconhecer os motores de passo e suas características.

1. Motores elétricos de corrente contínua

O motor de corrente contínua é o mais tradicional conversor rotativo de energia elétrica, o qual atingiu as características construtivas finais já no último quarto do século XIX. A estrutura básica de um motor de corrente contínua convencional tem duas partes fisicamente distintas, que são associadas a dois circuitos elétricos de funções bem específicas, o estator e o rotor.

Na Figura 01 podemos observar o estator, que aloja os polos indutores, chamados assim por induzirem tensão nas bobinas do rotor. Na sequência temos o rotor (ou armadura, como também é chamado), no qual são acomodadas as bobinas associadas à conversão de energia ou as que geram o movimento e, em uma das extremidades da armadura, é acomodado também o comutador com as escovas.

Figura 01 - Construção básica de um motor de corrente contínua. (Imagem em 3D.)



1.1 Estruturas físicas

O motor de corrente contínua é composto por três partes básicas: estator, rotor e comutador.

a) O ESTATOR, visto na Figura 02, é o nome dado à parte fixa do motor na qual estão contidas as bobinas indutoras, também chamadas de bobinas de campo. Essas bobinas são alimentadas com tensão contínua e geram um campo magnético fixo que pode ter um ou mais enrolamentos por polo. Cada enrolamento por polo

pode ter outro enrolamento paralelo (shunt) construído com fio de menor seção e várias espiras. No interior do enrolamento shunt podemos encontrar também um enrolamento série construído com fio de maior seção e poucas espiras.

Figura 02 - Estator do motor CC



Fonte: ALIBABA.COM Disponível em:

<https://sc01.alicdn.com/kf/HTB16OWOHFXXXafVXXq6xXFXXc/gasoline-generator-spare-parts-Stator-rotor.jpg>. Acesso em: 13 de ago. 2017.

b) O ROTOR, TAMBÉM CHAMADO DE ARMADURA, tem geometria cilíndrica e é composto por bobinas que recebem tensão contínua para produzir campo magnético. É a parte do motor que relaciona maior potência elétrica no processo de conversão eletromecânica de energia.

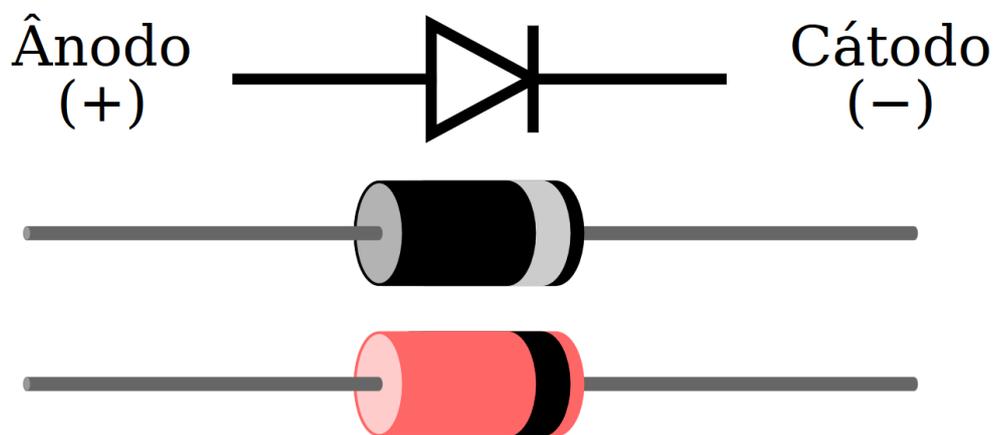
Figura 03 - Rotor de um motor CC



Fonte: AMAZON. Disponível em: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61femresdsL._SL1100_.jpg. Acesso em: 13 de ago. 2017.

c) O COMUTADOR é um retificador mecânico da tensão o qual exerce a mesma função dos diodos retificadores. Serve para garantir que o sentido das correntes que circularam no interior das bobinas tenha sempre a mesma direção.

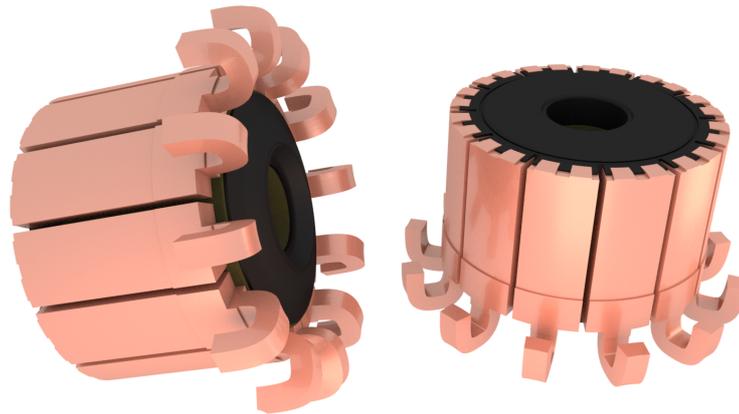
Figura 04 - Diodos



Fonte: Wikipedia. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Diode_pinout_pt.svg. Acesso em: 18 de ago. 2017.

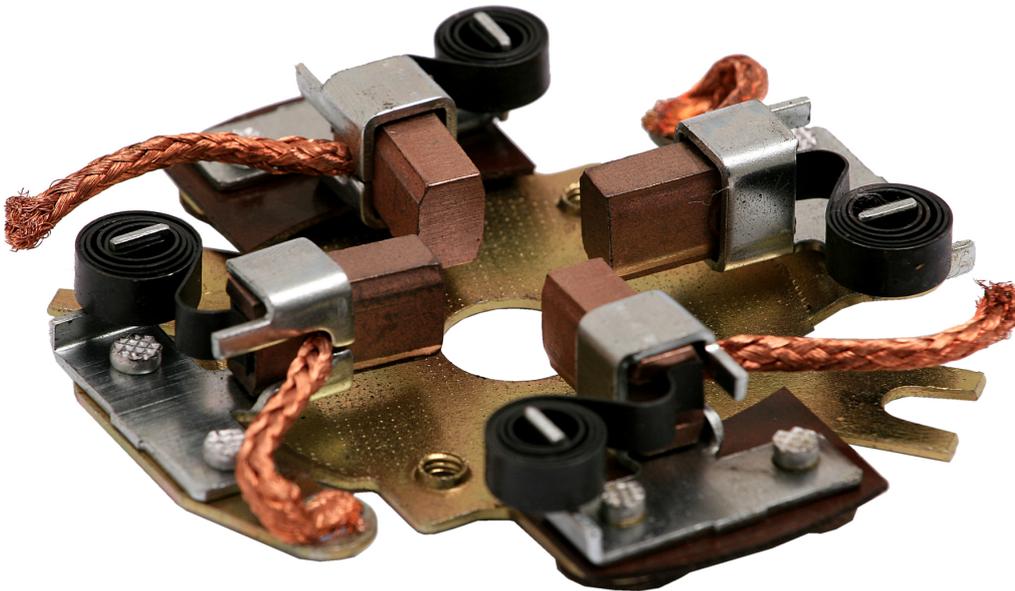
O comutador mantém contato entre a parte fixa do motor e a parte girante através de escovas que são fabricadas, normalmente, por ligas de carbono e que estão em constante atrito com o comutador.

Figura 05 - Comutador



d) **AS ESCOVAS** geralmente são feitas de liga de carbono e são responsáveis pelo contato elétrico entre a parte fixa e a parte móvel do motor. Devido a elas estarem em contato com o comutador, o atrito provoca grande desgaste, de modo a ser necessária uma manutenção com maior frequência. Na Figura 6 podemos ver a estrutura de fixação das escovas:

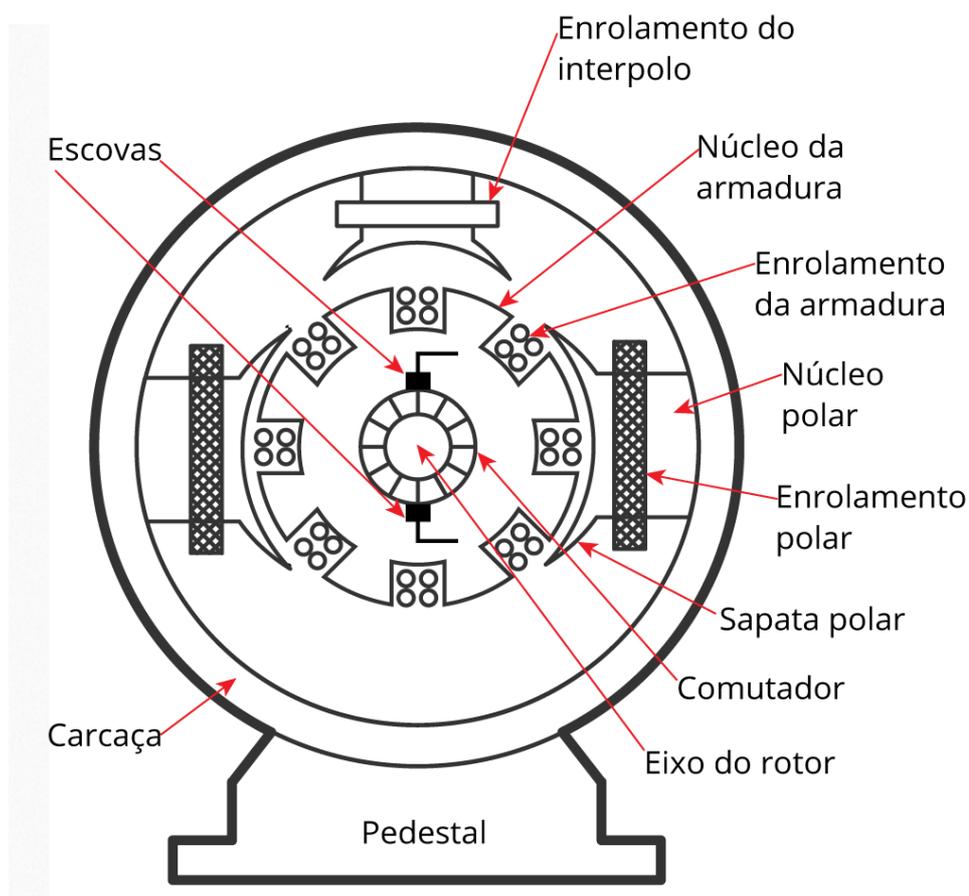
Figura 06 - Suporte das escovas de um rotor bobinado



Fonte: ZLG AUTOPEÇAS ELÉTRICAS. Disponível em: <http://cliczlg.com.br/blog/wp-content/uploads/2011/10/zlg-300.jpg>. Acesso em: 18 de ago. 2017.

e) **INTERPOLO E COMPENSADOR** são enrolamentos inseridos no estator, respectivamente entre os polos e a sapata polar. Eles estão ligados em série com a bobina da armadura e servem para reduzir os efeitos da reação da armadura (deslocamento da linha neutra) quando ela é percorrida por uma corrente significativa. Os polos auxiliares, fisicamente bem menores que os principais (indutores), são fixados entre estes e, por essa razão, são denominados interpolos, cujas funções serão explicadas adiante.

Figura 07 - Vista em corte de um motor CC com Rotor, enrolamento polar e interpolo



Fonte: Adaptado de AMAZOM. Disponível em:

<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAABdDAAL-2.jpg>. Acesso em: 18 de set. 2017

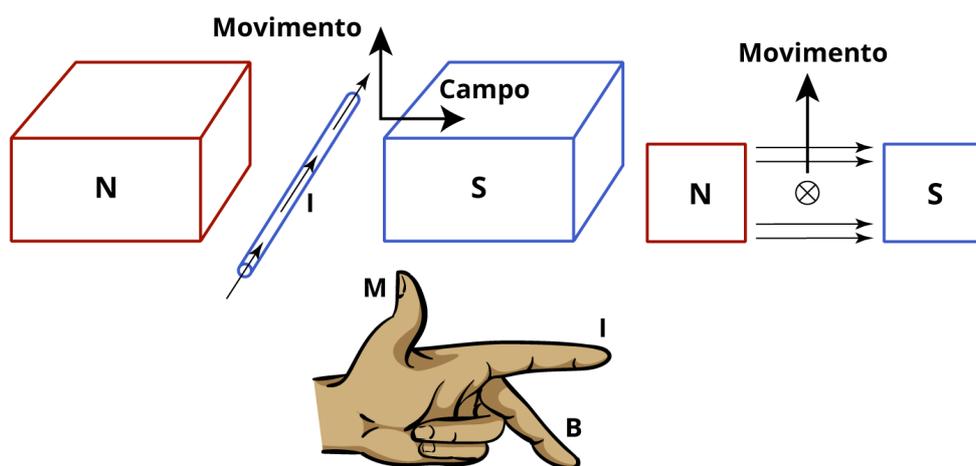


Considerando o que estudamos até aqui, você poderia citar as principais partes de um motor CC e suas funções?

2. Princípio de funcionamento

Para compreender o princípio de funcionamento de um motor CC, temos de analisar quatro estágios. Porém, antes de iniciarmos essa análise, devemos conhecer a regra da mão direita para motores, que difere da regra da mão direita vista na Aula 01. Nessa nova regra que possibilitará a compreensão do sentido de rotação do motor, o polegar indica a direção da força, o indicador o sentido da corrente e o restante dos dedos as linhas de campo, conforme pode ser visto na Figura 08.

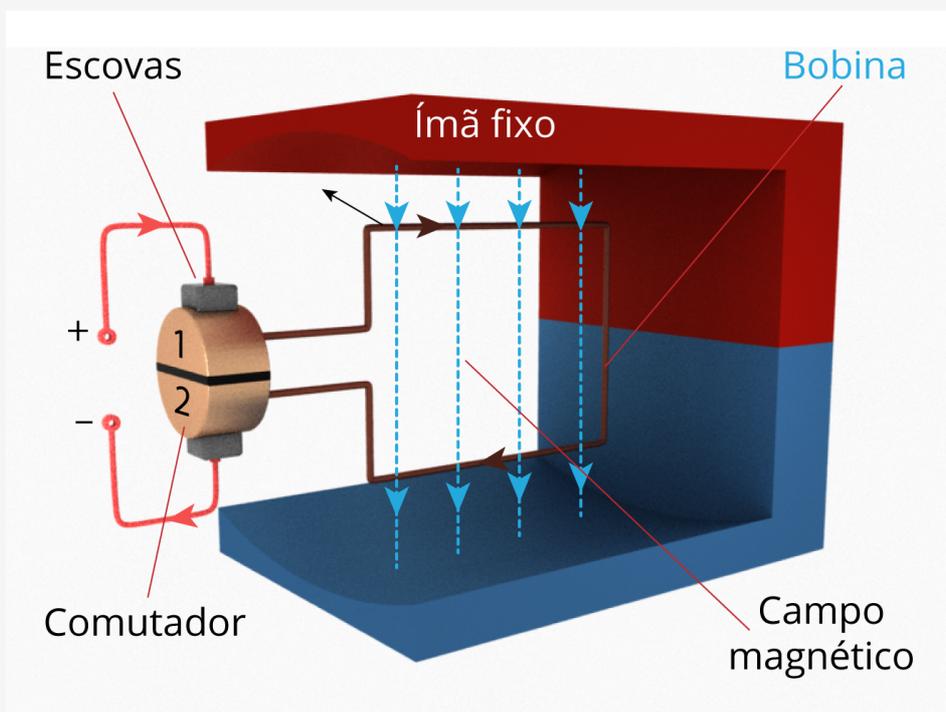
Figura 08 - Regra da mão direita para motores



Para facilitar o entendimento do funcionamento de motores CC, consideraremos que a bobina da armadura possui apenas uma espira. Dessa forma, essa espira estará inicialmente posicionada de modo paralelo às linhas do campo fixo. Assim, por estar inserida dentro do campo magnético do ímã e totalmente atingida pelas linhas desse campo, essa espira sofrerá a ação máxima do campo magnético do ímã.

A bobina da armadura será alimentada com uma tensão contínua através das escovas e do comutador. A polaridade é definida como positiva se corresponder ao lado 1 do comutador, e como negativa se corresponder ao lado 2, como pode ser visto na Figura 09.

Figura 009 - Primeiro estágio de funcionamento de um motor CC



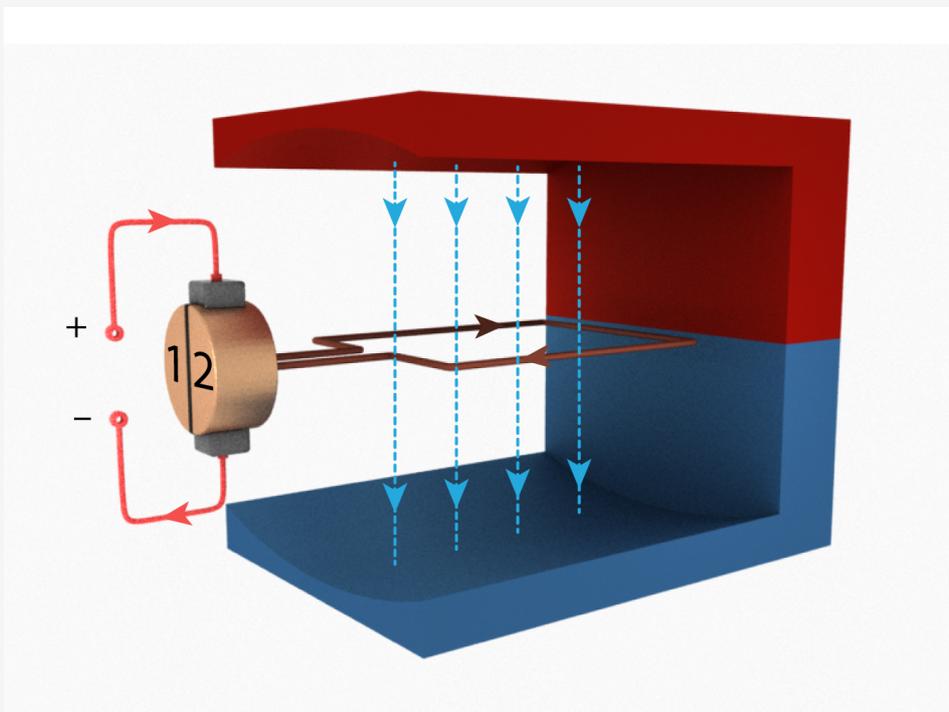
Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Pelas leis do eletromagnetismo, temos que uma espira percorrida por uma corrente elétrica produz um campo magnético em torno dessa espira. Aplicando a regra da mão direita para a espira, percebemos que as linhas de campo formadas nela terão a mesma direção das linhas de campo do ímã. Assim, a interação entre os dois campos magnéticos criará uma reação de repulsão entre eles, provocando um movimento de rotação no rotor, por ser a

parte móvel do motor, já que o estator não poderá se movimentar. Essa movimentação irá seguir a direção da força na regra da mão direita já mostrada na Figura 08.

Após receber o impulso inicial resultado da interação entre os campos magnéticos da espira e do ímã, o rotor irá girar até atingir uma região que o deixe fora da ação das linhas do campo magnético do ímã, formando um ângulo de 90° entre as linhas do campo do ímã e a espira, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Segundo estágio do rotor, espira alinhada a 90° das linhas de campo do ímã. (Imagem em 3D)



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

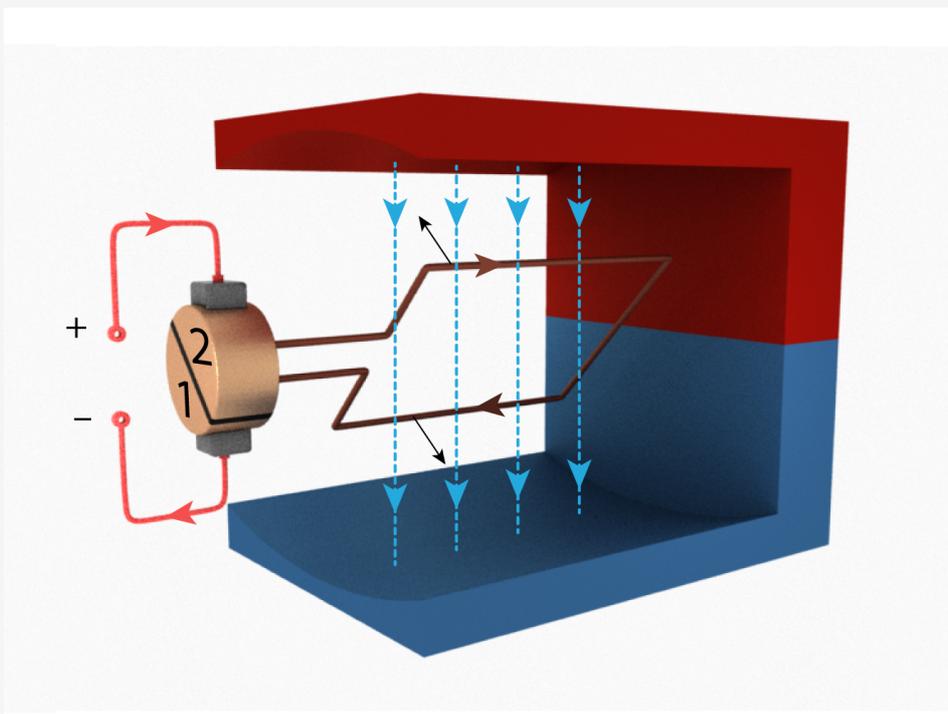
Porém, como o impulso dado no primeiro estágio é muito forte, a espira irá girar até atingir o terceiro estágio, pois a força aplicada inicialmente com a interação dos dois campos é maior do que a necessária para a espira alcançar o terceiro estágio. O mesmo impulso de força é dado do terceiro estágio para o primeiro, fazendo com que ela sofra a mesma intensidade de força e retorne à posição inicial.

Nesse estágio a espira gira 180° , invertendo sua posição. Assim, o lado 2 do comutador ficará voltado para parte superior e o lado 1, para o inferior. Contudo, o comutador manterá a corrente no mesmo sentido que no primeiro

estágio, fazendo com que a espira continue a se movimentar também no mesmo sentido do primeiro estágio e seja impulsionada para concluir o giro de 360° .

Na verdade, esse estágio é definido apenas como uma posição intermediária em que a bobina está inclinada com relação às linhas do campo fixo em um ângulo de aproximadamente 30° , como pode ser visto na Figura 11. O quarto estágio serve apenas para comentarmos a ação contínua da diminuição da força de interação entre os campos sofrida pela bobina da armadura. Essa ação atinge seu máximo no estágio 01 ou no 03 e, até que atinja o estágio 02, no qual chega a zero, tem sua força reduzida conforme o aumento do ângulo. O motor passa do estágio 02 ao 03, ou do 02 ao 01, de acordo com o sentido de rotação, pois a força produzida no estágio 01 ou 03 é suficiente para que ele tenha um deslocamento maior que 90° .

Figura 11 - Quarto estágio. (Imagem em 3D)



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

A descrição realizada acerca dos quatro estágios faz um resumo simplificado do princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua, o que lhe permitirá uma boa compreensão sobre o assunto desta aula. Mais à frente você notará que

não é tão simples assim, contudo já terá uma base estruturada para aplicar nos desafios que surgirão, pois teremos de lidar com termos mais técnicos e fenômenos um pouco mais complexos, tais como a força contra-eletromotriz (FCEM).

3. Característica de funcionamento dos motores CC

A velocidade de um motor CC está relacionada à fem (força eletromotriz) aplicada na bobina da armadura e à corrente que circulará por ela. Essa corrente pode ser calculada pela *lei de Ohm*, medindo-se a resistência ôhmica da bobina da armadura como se ela fosse alimentada isoladamente por uma tensão. Assim, temos:

$$I_a = \frac{fem}{R_a}$$

Onde:

I_a - Corrente da armadura (A);

fem - Força eletromotriz (V);

R_a - Resistência elétrica da bobina da armadura (Ω).

A armadura ao girar irá cortar constantemente as linhas de campo do estator, criando em si própria uma $fcem$ (força contra-eletromotriz) que serve como uma espécie de freio para que o rotor não desenvolva altas velocidades. O motor em movimento apresenta a seguinte fórmula para calcular a corrente na armadura:

$$I_a = \frac{fem - fcem}{R_a}$$

Onde:

I_a – Corrente da armadura (A);

f_{em} – Força eletromotriz (V);

f_{cem} – Força contra-eletromotriz (V);

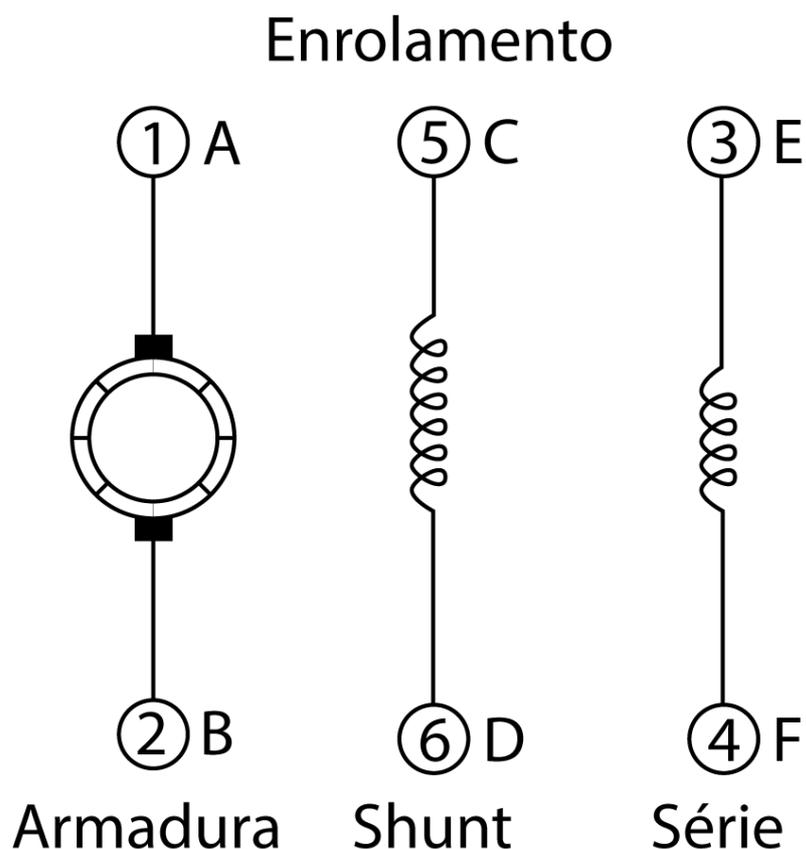
R_a – Resistência elétrica da bobina da armadura (Ω).

Então, se aumentarmos a “ f_{em} ” na armadura, naturalmente a corrente irá aumentar e a velocidade do eixo conseqüentemente aumentará. Por outro lado se diminuirmos a “ f_{cem} ”, o motor poderá também aumentar sua velocidade e vir a comprometer as partes móveis, caso essa velocidade atinja grandes valores.

3.1 Tipos de ligação dos motores CC

A ligação de um motor CC depende do conhecimento que ele possui sobre a carga a ser acionada e da sua própria constituição. Como visto na Figura 12, a bobina da armadura está numerada como (1) e (2) e identificada por A e B. Já as bobinas do estator estão numeradas como (5) e (6) e identificadas por C e D para o shunt, e como (3) e (4) identificadas por E e F para a série.

Figura 12 - Esquema de numeração dos terminais do motor CC



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Para evitar acidentes e prejuízos desnecessários, estudaremos as formas de ligação do motor de corrente contínua e suas aplicações, pois uma ligação inadequada dos terminais do motor poderá levá-lo a não funcionar adequadamente ou até provocar avaria nos mancais.

São três os modos de ligação: PARALELO (SHUNT), SÉRIE e SÉRIE / PARALELO (COMPOUND).

3.1.1 Motor paralelo (shunt)

Nesse tipo de ligação a alimentação da bobina do estator, também chamada de excitação, é feita de forma paralela com a bobina da armadura pela mesma fonte de tensão. Normalmente a armadura é constituída por fios de maior seção e menor

número de espiras do que as existentes na bobina do estator, dessa forma, ela consome mais corrente. Essa corrente é responsável pelo torque desenvolvido no motor.

Como os enrolamentos da armadura e do shunt são alimentados pela mesma fonte, se a tensão for mantida constante a velocidade do motor permanecerá também constante quando ele estiver sem carga. Porém, se aplicarmos carga ao motor, haverá uma pequena perda de velocidade em virtude da resistência da armadura, além de um aumento do aquecimento.

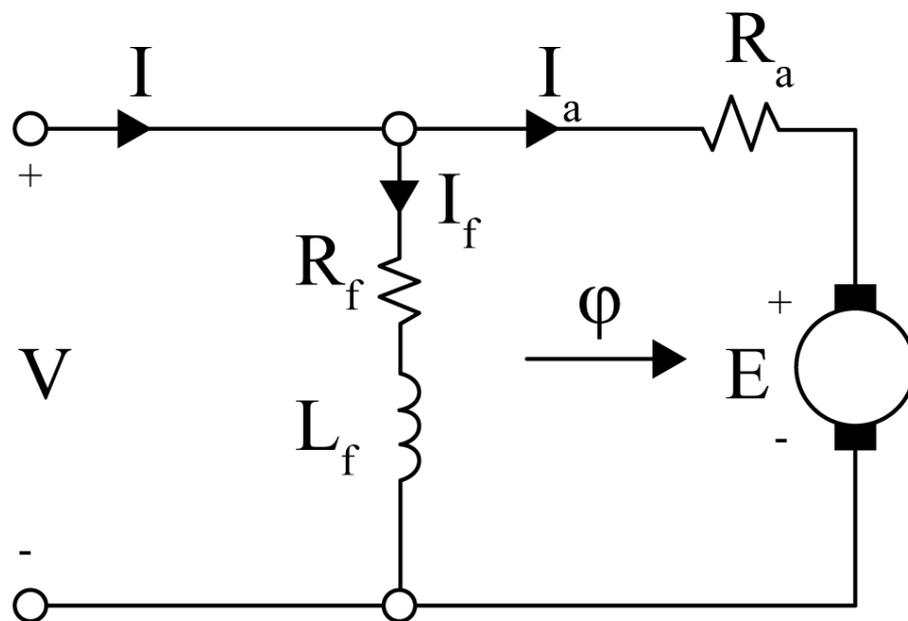
A temperatura aumenta devido ao esforço mecânico imposto na ponta do eixo do motor e pela diminuição da força contra-eletromotriz, ocorrida com a perda da velocidade da bobina. Diante disso, a corrente no enrolamento da armadura irá aumentar para poder compensar o torque.

Contudo, para aumentar a velocidade, é necessário diminuir o fluxo magnético na excitação. Essa diminuição é possível quando se coloca um reostato em série com a bobina do enrolamento shunt para reduzir a corrente que circula por ela. Dessa forma, o fluxo magnético será diminuído e, então, o motor aumentará sua velocidade. Porém, deve-se ter o cuidado de não abrir o circuito do shunt, pois o motor perderá o fluxo e a f_{cem} , o que pode fazê-lo atingir velocidades perigosas para a máquina.

Os reostatos são resistências variáveis, ou seja, são barreiras variáveis que dificultam a passagem da corrente elétrica em seu condutor. Com essa variação é possível aumentar ou diminuir a intensidade da corrente elétrica nesse circuito, o qual é responsável por conduzir eletricidade.

A representação do motor através de um circuito equivalente alimentado de forma paralela pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 - Representação do circuito equivalente do motor CC alimentado em paralelo.



Fonte: Adaptado de BATISTA, José. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/igorfortal/ce-aula-05-mquina-cc>. Acesso em: 17 jan. 2018.

Onde:

V - tensão da fonte (V),

E - tensão na armadura (força eletromotriz) (V),

I - corrente total (A),

I_a - corrente da armadura (A),

R_a - resistência da armadura (Ω),

I_f - corrente da excitação (A),

R_f - resistência da excitação (Ω),

L_f – indutância da excitação (Hr),

ϕ – fluxo magnético da excitação (Wb).

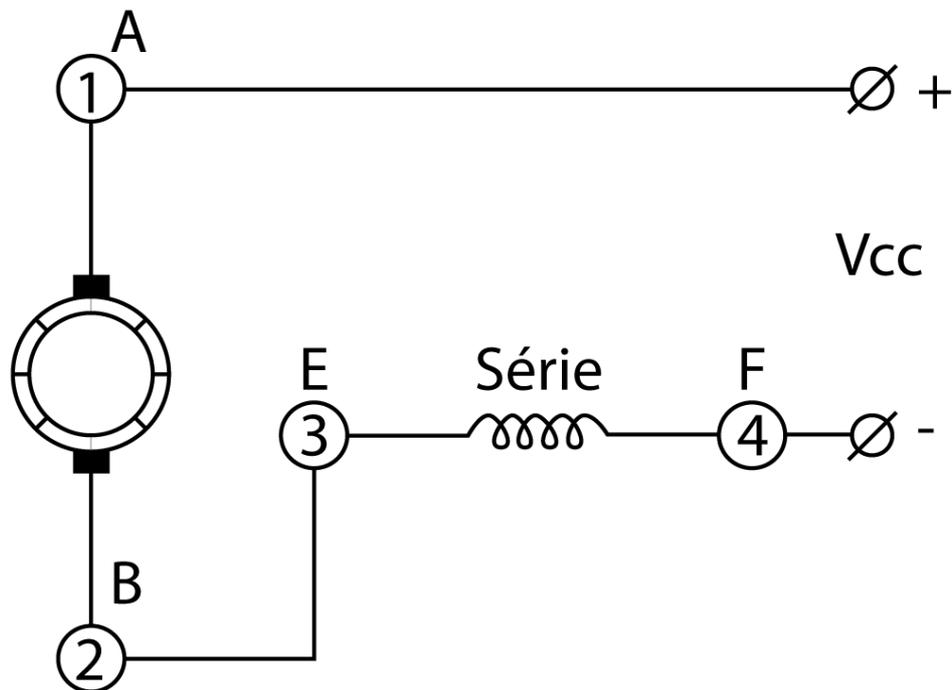
3.1.2 Motor série

Nesse modo de ligação o enrolamento de excitação está ligado em série com o enrolamento da armadura e alimentado pela mesma fonte de tensão dela. Nesse caso, existem dois enrolamentos com diferentes seções e números de espiras ligadas em série. Podemos deduzir, então, que o campo criado na excitação dependerá da mesma corrente aplicada ao enrolamento da armadura.

- Se o motor é ligado sem carga, temos um campo magnético na excitação, o qual depende da corrente absorvida da armadura.
- Se essa corrente é baixa, o campo magnético induz uma baixa f_{cem} na armadura e a velocidade aumenta consideravelmente em razão da corrente e da f_{em} da armadura.
- Se, ao contrário, aplicarmos uma carga ao eixo do motor, a corrente de armadura e o campo na excitação aumentarão, fazendo com que a velocidade diminua consideravelmente.

Comparando o motor shunt (paralelo) e o motor série, podemos observar que este último tem excelente torque de partida, mas uma péssima regulação da velocidade, pois todo aumento de carga resulta no aumento da corrente e, conseqüente, em queda de velocidade. Isso é esperado, já que os enrolamentos estão em série, como vistos na Figura 14.

Figura 14 - Esquema de ligação de um motor CC série



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

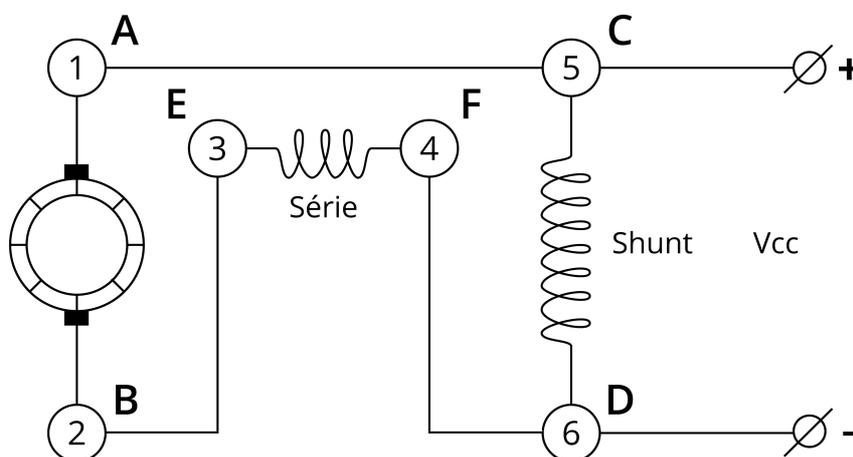
Se aumentarmos a corrente na armadura, o comportamento do campo nesses enrolamentos será extremamente afetado. Quanto maior for a corrente, menor será a velocidade, devido à existência de uma f_{cem} mais atuante. A velocidade no motor série está intrinsecamente relacionada à corrente sob a armadura, por isso é recomendável que não se ligue esse motor sem a carga. Caso o seu torque esteja elevado e em vazio, ocorrerá um aumento exagerado da velocidade, o que poderá provocar a destruição da máquina.

Com o intuito de combinar os melhores aspectos da ligação shunt, referentes ao controle da velocidade com o alto torque de partida da ligação série, existe a ligação composta (*compound*). Esse tipo de ligação é utilizado quando há a necessidade de se manter a velocidade constante com variações extremas da carga e, assim, poder aproveitar o alto torque do motor série, sem correr o risco da velocidade disparar quando ocorrer a diminuição da carga ou a sua retirada total.

Esse tipo de motor apresenta duas características operacionais importantes: ele pode atuar de maneira cumulativa, ou como excitação composta subtrativa. Em ambos os casos a ligação dependerá do enrolamento da bobina shunt. Dessa forma, a mudança do modo cumulativo para o subtrativo é feita através da inversão da ligação na bobina shunt.

Um exemplo desse modo de operação cumulativa pode ser observado no esquema de montagem do motor, no qual é feita a conexão do enrolamento shunt em paralelo com o conjunto "armadura e enrolamento série", como pode ser visto na Figura 15.

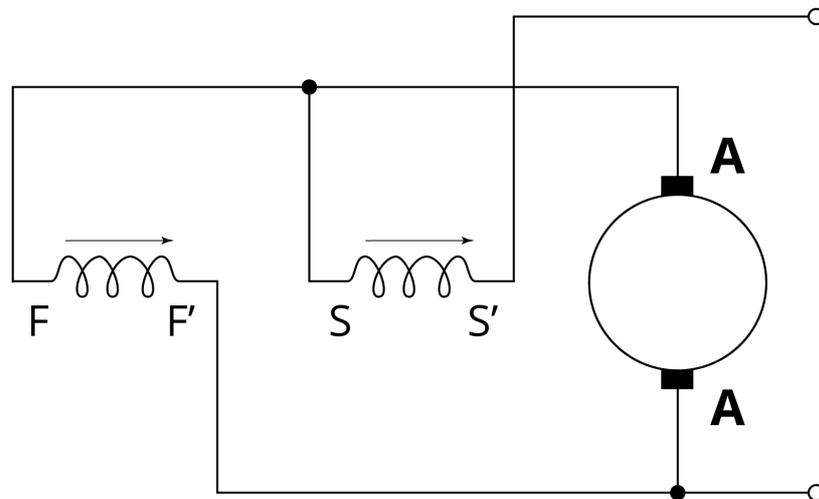
Figura 15 - Esquema de ligação do motor compound cumulativo



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Nessa montagem cumulativa, o enrolamento shunt deve produzir campo magnético com direção e sentido iguais aos produzidos pelo campo no enrolamento série, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Esquema do circuito equivalente à excitação *compound* aditiva (ou cumulativa)

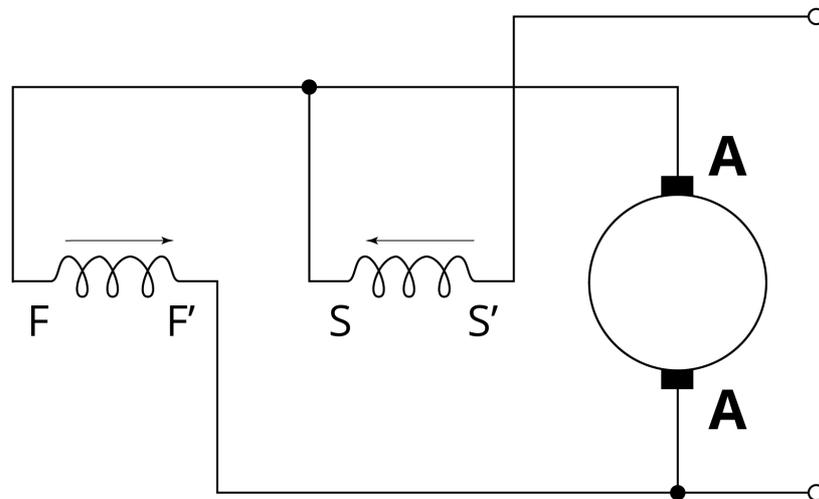


Fonte: Adaptado de CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO RN. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc-1>> Acesso em: 17 de set. 2017.

Agora, obtemos um motor com torque alto na partida, mas com velocidade limitada. Além disso, conseguimos também fazer com que ele tenha baixa variação de velocidade, mesmo variando a carga. Em algumas aplicações, após a partida, quando o motor está operando em regime, ou seja, quando ele atinge suas características nominais de tensão, corrente, potência e velocidade, o enrolamento série poderá ser curto-circuitado para não interferir no controle da velocidade.

A segunda técnica *compound* mostrada aqui é a diferencial, por meio da qual é possível obtermos uma queda significativa na velocidade com o aumento da carga. Podemos adaptar o motor *compound* em algumas aplicações para atender a essa necessidade, ligando o enrolamento shunt de modo que produza um campo magnético contrário ao campo magnético do enrolamento série, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Esquema do circuito equivalente à excitação compound diferencial (subtrativa)



Fonte: Adaptado de CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO RN. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc-1>. Acesso em: 17 de set. 2017.

O enrolamento série, quando está ativo no motor, produz um campo em oposição ao campo do enrolamento shunt, reduzindo o campo resultante. Dessa forma, aumenta-se a velocidade, porém, também é possível ocorrer a diminuição de velocidade com o aumento da carga, o que já é uma característica do motor série. A aplicação dessa técnica deve ser limitada, em virtude dos riscos da instabilidade na velocidade do motor.

Um exemplo de aplicação dessa segunda técnica de ligação é a operação de um elevador de carga, o qual, para subir com carga, pode ser ligado em série. No entanto, para descer sem carga, não necessita de torque, mas apenas do controle de velocidade, podendo ser ligado no shunt. Quando o elevador estiver operando numa subida sem carga, pode ser ligado no *compound*.

3.2 Ajustes no motor CC

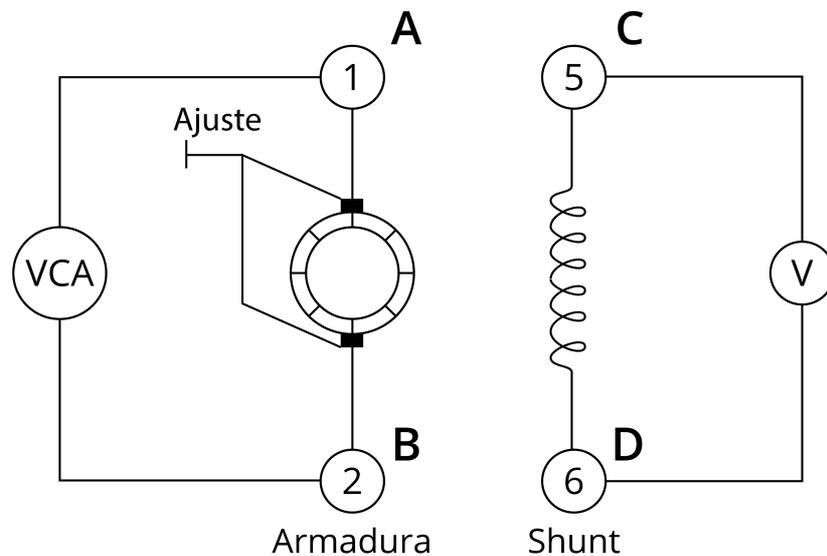
O ajuste da linha neutra do motor CC será necessário quando as bobinas da armadura se deslocarem passando por uma zona intermediária entre os polos. Essa zona terá seu ponto máximo quando a bobina da armadura estiver totalmente perpendicular às linhas do campo fixo. Nessa posição a ação do campo fixo não atuará sobre a armadura e não haverá mais a força magnetomotriz.

É nesse instante que devemos desligar a fonte de alimentação da armadura para inverter a polaridade no comutador, evitando, assim, a geração de faíscas (arco elétrico) no comutador e o desgaste prematuro das escovas.

A maneira simples de fazer esse ajuste consiste em aplicarmos uma tensão alternada nas bobinas da armadura, cerca de 50% da tensão nominal do motor, e medirmos a tensão induzida na bobina do estator (*shunt*). Dessa forma, a armadura se assemelharia ao primário do transformador e o *shunt*, ao secundário.

A posição ideal do ajuste é obtida quando ocorrer o valor zero da conversão de energia, ou seja, quando posicionar as escovas na região onde o campo magnético gerado na armadura induza a menor corrente no *shunt*. A representação esquemática desse circuito pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - Esquema de ligação para o ajuste da linha neutra



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

3.3 Equações das Máquinas CC

No estudo teórico da máquina CC são utilizadas equações fundamentais da máquina CC que levam em conta o fluxo magnético na máquina (ϕ), a corrente na armadura (I_a), a velocidade angular (ω) e uma constante da máquina denominada de (K). As duas principais equações são: o torque, também chamado de conjugado ou binário, que representa a força disponibilizada pelo motor na ponta do seu eixo para poder movimentar as cargas a ele acopladas; e a tensão aplicada ao enrolamento da armadura, que é responsável pelo controle da velocidade do motor.

3.3.1 Torque

A obtenção de torque em motores elétricos rotativos, devido à conversão eletromecânica de energia (elétrica em mecânica ou vice-versa), se dá pela interação dos fluxos do estator e do rotor, a qual, neste texto, é denominada torque eletromecânico -*Tem*.

Para que o torque desenvolvido seja unidirecional (e, assim, o rotor gire continuamente), cada polo indutor deve interagir sempre com o mesmo fluxo produzido pela corrente nos condutores da armadura, o que significa dizer que as

correntes nos condutores sob uma determinada região polar devem ter sempre o mesmo sentido. O torque eletromecânico "*Tem*" desenvolvido se inverte quando somente a corrente de excitação ou a corrente de armadura é invertida: no primeiro caso, os polos do campo indutor são invertidos e, no segundo caso, invertem-se os polos da armadura. Se, por acaso, os dois fluxos são invertidos, o sentido do torque se mantém.

O torque pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a \text{ (N} \cdot \text{m) Newton metro,}$$

Onde:

T - Torque do motor (N.m);

ϕ - Fluxo magnético (Wb);

I_a - Corrente na armadura (A);

K - Constante do motor, que pode ser calculada por:

$$K = \frac{P \cdot Z}{2 \cdot a \cdot \pi}$$

Onde:

P - Número de polos do motor;

Z - Número de condutores da armadura;

a - Número de caminhos paralelos dos condutores da armadura.

O valor de " a " depende do tipo de enrolamento. Para motores com o enrolamento imbricado (empilhado), o valor de " a " é igual ao do número de polos.



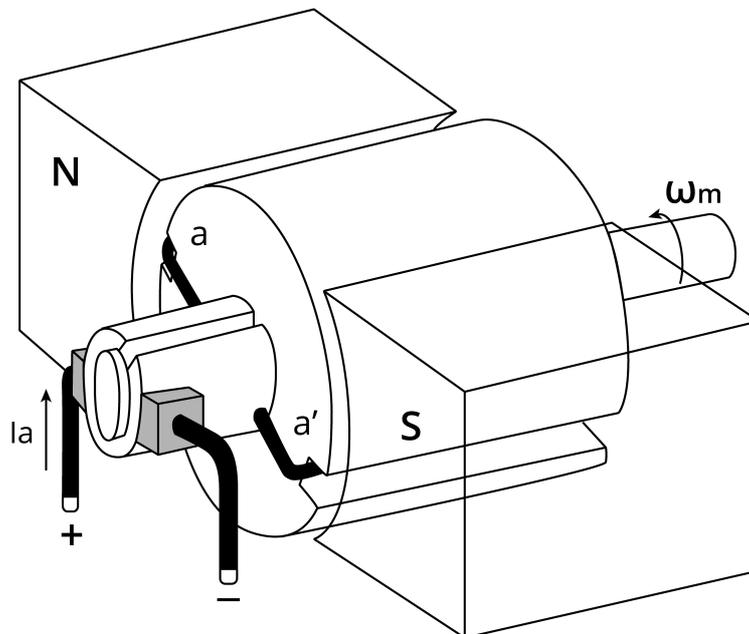
Atividade 01

1. Calcule o torque desenvolvido por uma máquina CC de quatro polos, com 400 condutores ativos, 1800 RPM e corrente aplicada na armadura de 31,4 A (do tipo imbricado), com um fluxo magnético na máquina de 0.05 Wb.

3.4 Comutação

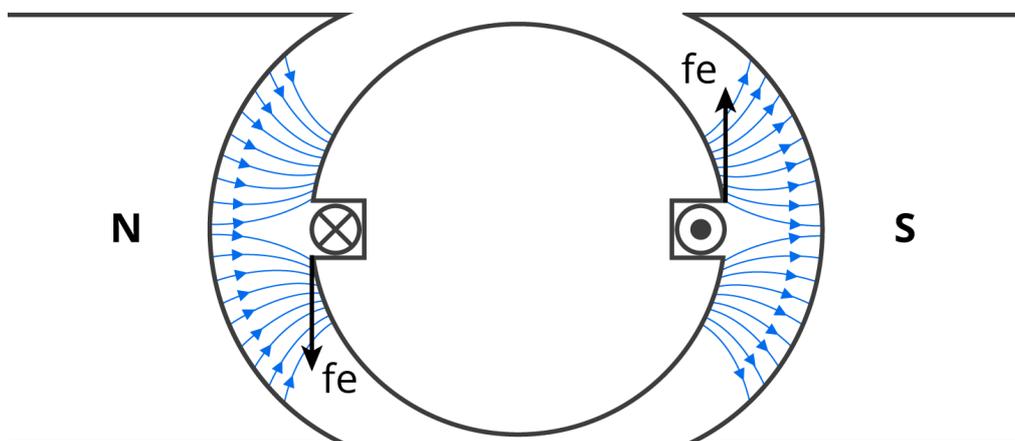
A fim de entender a comutação, considere um motor elementar de dois polos que esteja funcionando no modo motor e uma armadura que tenha uma bobina de uma espira. Para a posição da bobina e da corrente externa, ilustradas na Figura 19, a sobreposição do fluxo gerado pela corrente nos condutores (a) e (a') com a corrente do fluxo indutor resulta em uma distribuição não uniforme do fluxo na região dos dentes, nos quais os condutores estão colocados.

Figura 19 - Bobina da armadura submetida a uma corrente externa



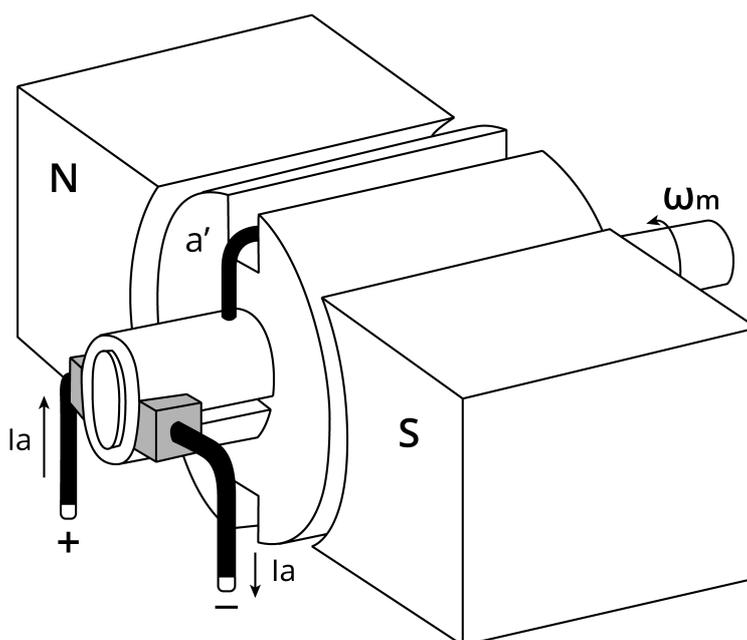
Assim, gera-se uma força que age sobre a estrutura cilíndrica do rotor, da região de maior concentração de fluxo para a de menor fluxo, isto é, o torque eletromecânico gerado age no sentido de impulsionar o rotor no sentido anti-horário, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Torque eletromecânico



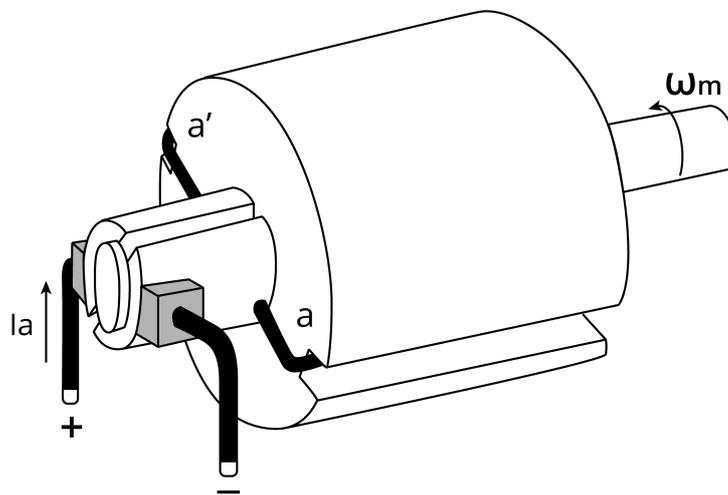
Na posição intermediária – posição interpolar –, a bobina concatena o máximo de fluxo e, portanto, a tensão induzida nela é nula (lei de Faraday). Como ilustrado na Figura 21, nessa posição a escova curto-circuita a bobina e, idealmente, deseja-se que a corrente na bobina seja nula.

Figura 21 - Rotor na posição intermediária



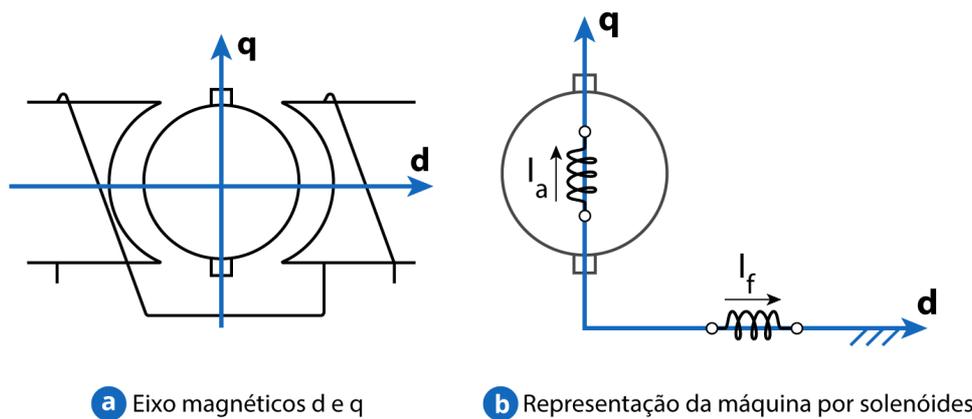
Quando o rotor desloca o equivalente a π radianos, o sentido da corrente nos lados (a) e (a') da bobina é invertido por ação do comutador, pois, sendo as escovas estacionárias, cada uma delas está sempre em contato com uma bobina (não importa qual seja), que se localiza instantaneamente debaixo do mesmo polo, como ilustrado na Figura 22. Esse processo de inversão de corrente, denominado comutação, deve ser feito de maneira suave e linear, como ilustrado idealmente na Figura 5. O intervalo de tempo no qual a corrente é invertida na bobina é o tempo de comutação t_c .

Figura 22 - Inversão da corrente pelo comutador



Pelo fato de o comutador e as escovas garantirem sempre o mesmo sentido de corrente nos condutores da armadura posicionados sob o mesmo polo, o fluxo criado por essa corrente é estacionário e se posiciona, no caso ideal, em quadratura (eixo q) com o eixo magnético do fluxo do campo indutor (eixo d), como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Eixo magnéticos do campo indutor (eixo d) e da armadura (eixo q)



Observe que os enrolamentos do campo indutor e da armadura são designados por solenóides colocados nos eixos mostrados na Figura 23b. Diz-se, então, que o motor de corrente contínua é de campo estacionário, em contraste com o motor de indução e síncronos, que funcionam por causa do campo girante.

Enquanto o enrolamento de campo tem a função de gerar o fluxo magnético de excitação, a armadura é a parte do motor relacionada à maior potência elétrica envolvida no processo de conversão eletromecânica de energia, seja como gerador, seja como motor. Valores típicos da potência elétrica envolvida no circuito de campo estão na faixa de 3% a 5% da potência da armadura.

3.5 Controle de velocidade

O controle da velocidade de uma máquina de corrente contínua passa essencialmente pela regulação da tensão aplicada na armadura ou pela diminuição da corrente aplicada no campo. Mas, como calcular a tensão na armadura? Para responder a essa pergunta, observe a fórmula explicada a seguir.

3.5.1 Tensão na armadura

O valor da tensão gerada na armadura pode ser calculado pela seguinte equação:

$$E_{arm} = K \cdot \phi \cdot \omega$$

Onde:

K – Constante do motor, já definida anteriormente;

ϕ – fluxo magnético (Wb);

ω – velocidade angular do eixo (rad/s), calculada a partir da equação:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n(\text{rpm})}{60}$$

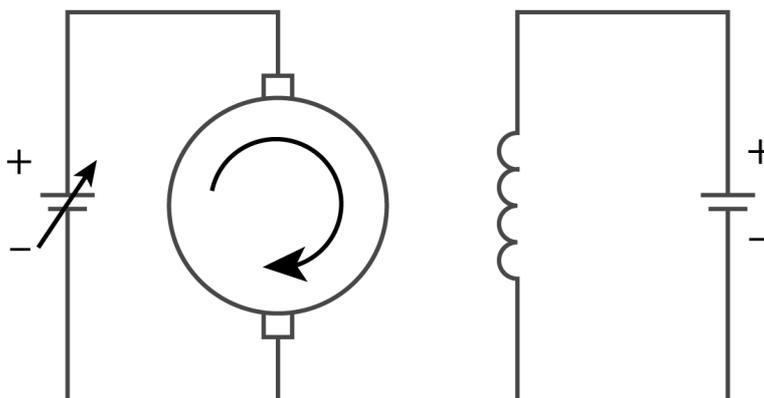


Atividade 02

1. Calcule a tensão induzida na armadura para uma máquina CC de quatro polos, com 400 condutores ativos, (do tipo imbricado), com uma velocidade de 1800 rpm e um fluxo magnético de 0.05 Wb.

Uma das técnicas usadas para a regulação de velocidade em motores CC depende diretamente da tensão aplicada à armadura (ver Figura 24). Nessa técnica, a tensão e a corrente são mantidas constantes no campo, o que faz o fluxo também permanecer constante. Já na armadura, a tensão é variada, fazendo com que a velocidade no eixo do rotor acompanhe a variação da tensão numa relação direta entre a tensão e a velocidade, de forma que o torque permaneça constante e a potência varie proporcionalmente com a velocidade.

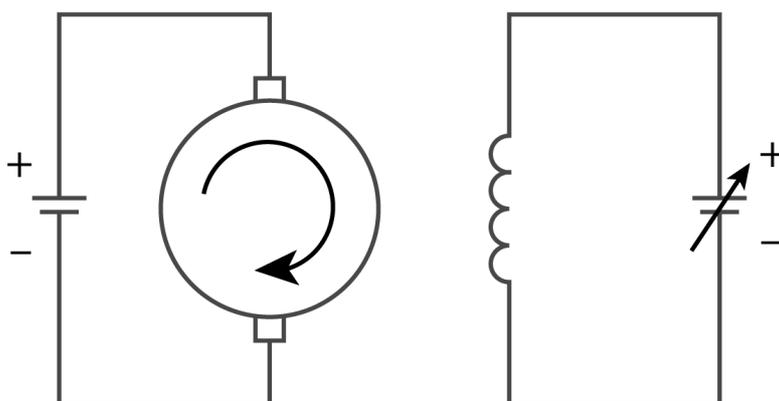
Figura 24 - Esquema do controle de velocidade aplicada na armadura



Fonte: Adaptado de FUENTES, Rodrigo Cardozo. Disponível em: <http://w3.ufsm.br>. Acesso em: 25 de set. 2017.

A segunda maneira de controlar a velocidade é mantendo a tensão constante na armadura e diminuindo a corrente no campo (ver Figura 25). Assim, o fluxo diminuirá, aumentando a velocidade no rotor. Nessa técnica, a potência é que permanece constante enquanto a velocidade aumenta. Já o torque diminui, devido ao aumento da rotação do eixo. Esse modelo de aumento de velocidade do motor pela redução do fluxo é denominado “enfraquecimento de campo” e deverá ser utilizado em máquinas que não necessitem de torque constante ao longo de sua faixa de variação da velocidade.

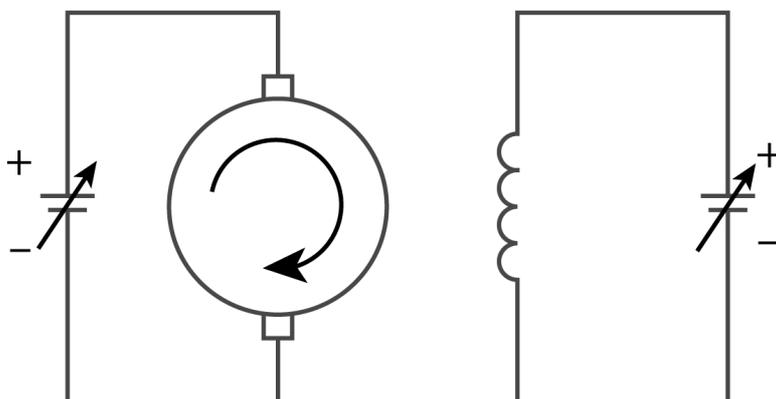
Figura 25 - Regulação da corrente na armadura



Fonte: Adaptado de FUENTES, Rodrigo Cardozo. Disponível em: <http://w3.ufsm.br>. Acesso em: 25 de set. 2017.

Uma terceira técnica empregada no controle da velocidade associa as duas citadas anteriormente, ou seja, o controle da tensão aplicada na armadura e nas bobinas de campo. Por sua vez, essa técnica proporciona um controle integral do torque e a da velocidade do rotor (Figura 26).

Figura 26 - Controle de velocidade com regulação de tensão na armadura e no campo



Fonte: Adaptado de FUENTES, Rodrigo Cardozo. Disponível em: <http://w3.ufsm.br>. Acesso em: 25 de set. 2017.

Dizemos que o motor CC apresenta uma boa regulação de velocidade quando está operando para diferentes cargas e não varia sua velocidade.

O cálculo do percentual é feito a partir da velocidade real do eixo do motor e da sua velocidade nominal através da seguinte equação:

$$\%reg. = \frac{n(RPM) \text{ sem carga} - n(RPM) \text{ com carga total}}{n(RPM) \text{ com carga total}} \cdot 100$$

3.6 Potência mecânica

A potência eletromecânica " P_{em} " de uma máquina elétrica CC operando no modo motor corresponde à fração da potência elétrica de entrada convertida em potência mecânica – esta, por sua vez, operando no modo gerador, designa a fração da potência mecânica convertida em elétrica.

No modo motor, a “ P_{em} ” é determinada, se as perdas no ferro forem ignoradas. Assim, ela é estabelecida a partir da subtração da potência elétrica de entrada da armadura menos as perdas no cobre de armadura, isto é:

$$P_{em} = (V_{ta} \cdot I_a) - (r_a \cdot I_a), \text{ ou } (V_{ta} - r_a \cdot I_a) \cdot I_a$$

Onde:

P_{em} - Potência eletromecânica (W);

V_{ta} - Tensão na entrada da armadura (V);

I_a - Corrente na armadura (A);

r_a - Resistência na armadura (Ω).

4. Procedimentos para Identificação dos Parâmetros Elétricos do Motor CC

Em um ensaio realizado em laboratório, foram verificados os parâmetros elétricos do motor de corrente contínua que apresenta as seguintes características: motor de 0,25 HP, velocidade de 1800 RPM, torque de 1,4 (N.m), alimentação na tensão nominal de 120 Vcc, corrente nominal de 2,8 (A), corrente no enrolamento shunt 0,3 (A), no enrolamento série de 3 (A), e na armadura de 3 (A). Esse experimento foi realizado para cada tipo de enrolamento (*shunt*, *série* e *componud*) e deverá servir como modelo para orientar os alunos que tenham condições de realizá-lo em outra máquina CC.

4.1 Procedimento do motor *shunt*

Serão apresentadas duas maneiras de medir a resistência dos enrolamentos, uma experimental e outra instrumental. Devem ser identificadas todas as partes do motor, bem como efetuar a contagem de lâminas do comutador, número de escovas, número de bobinas no estator, etc.

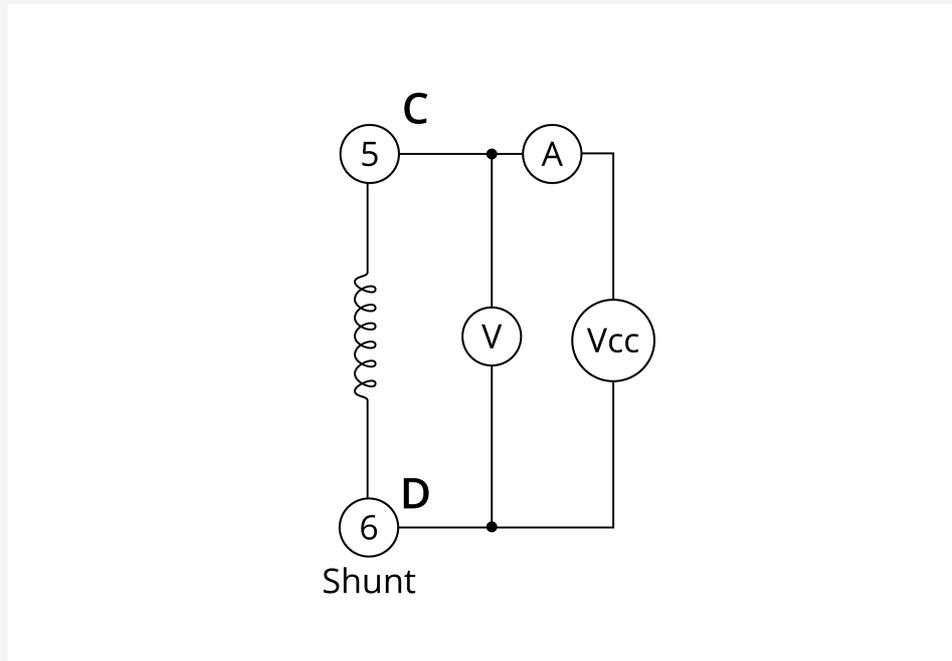
Identifique o número de escovas, de lâminas do comutador e de bobinas do estator antes do início dos testes, lembrando que, se o motor for de 4 polos, ele terá 4 grupos de bobinas com enrolamento série e 4 grupos com

enrolamentos *shunt*.

Execute a medição da resistência elétrica, utilizando um ohmímetro, dos enrolamentos, série, shunt e da armadura, que foram as seguintes: o enrolamento série 2 (Ω), *shunt* 261 (Ω) e da armadura 8 (Ω).

Alimente o enrolamento shunt com uma fonte ajustável de tensão V_{cc} , variando de 0 a 120 V_{cc} , conforme a Figura 27.

Figura 27 - Esquema de montagem do experimento



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Utilize também um amperímetro e um voltímetro no experimento e certifique-se de que a fonte está inicialmente na tensão zero. Só então, aumente vagarosamente e cuidadosamente a tensão no shunt, até que ele atinja sua corrente nominal, que no caso desse motor é de 0,3 (A). Note que, ao atingir a corrente nominal, temos uma tensão medida no voltímetro de 78 V_{cc} e ela é menor que a nominal do motor de 120 V_{cc} , isso ocorre porque estamos alimentando apenas o shunt e não existe "*f_{cem}*" para se opor à "*f_{em}*" que estamos aplicando.

A seguir desligue a fonte de tensão e calcule o valor da resistência do enrolamento shunt usando a lei de Ohm, ($V = R \cdot I$).

$$R = 78V_{cc}/0,3(A)$$

$$R = 260(\Omega)$$



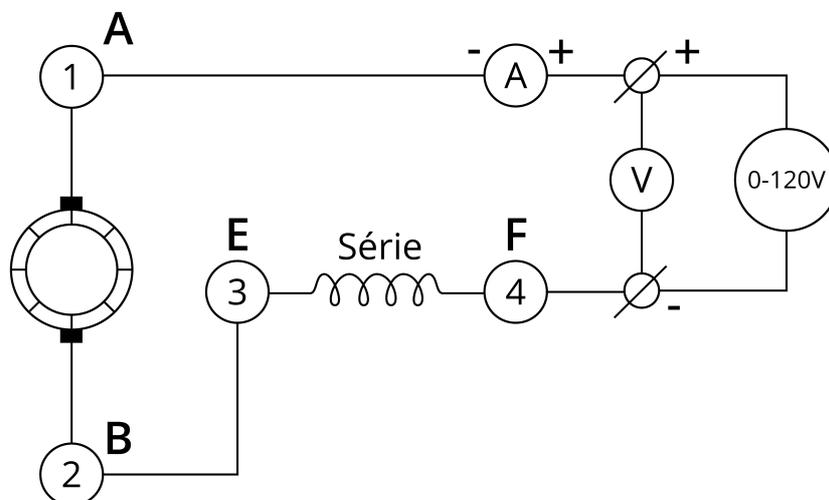
É importante observar que o valor calculado através da Lei de Ohm se aproximou do valor medido com o ohmímetro no 2º passo.

4.2 Procedimento do motor série

Nesse procedimento serão verificadas as características do motor série quanto à velocidade, ao torque, às respostas com carga e à corrente de armadura. Ele será apresentado em dois passos. Como estudado anteriormente, o motor série, caso parta sem carga, pode atingir velocidades perigosas em certas circunstâncias, portanto, siga todos os procedimentos corretamente antes de iniciar o experimento.

1º Passo – Para medir o torque e a velocidade na ponta do eixo do motor, serão necessários mais dois novos instrumentos: um dinamômetro, aparelho destinado a medir o torque de motores, e um tacômetro, que serve para medir a velocidade na ponta do eixo de motores. Execute a montagem do experimento de acordo com o desenho da Figura 28, deixando inicialmente a fonte desligada.

Figura 28 - Esquema do circuito equivalente do motor série



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Como teremos de ligar o motor sempre com carga, devemos utilizar um dinamômetro acoplado a seu eixo. Esse dinamômetro deverá ser ajustado para metade do torque do motor, equivalente a 0,7 (N.m). Dessa forma, quando o motor for ligado, já terá uma carga com a metade do torque acoplada na ponta do eixo, contribuindo para ele não atingir velocidades perigosas.

2º Passo - Aumente gradualmente a tensão da fonte cc. Observe inicialmente o sentido de rotação do eixo do motor para que o mesmo esteja no mesmo sentido do dinamômetro, no caso contrário, desligue a fonte, inverta a ligação no enrolamento série e volte a ligar a fonte para confirmar o sentido da rotação.

Ajuste a fonte para 120 Vcc e faça a leitura do amperímetro e do tacômetro para o torque de 0,7 (N.m). Repita esse procedimento das leituras, variando o dinamômetro para pontos intermediários entre zero e 1,4 (N.m), ou seja, para 0,35(N.m), 1,0 (N.m) e 1,4 (N.m).

Anote os valores citados e faça uma tabela com esses dados, os quais devem ficar próximos ao da Tabela 1 mostrada abaixo. Observe que a velocidade do motor, quando está sem carga, é alta se comparada à nominal dele, por isso não devemos

deixá-lo operar nessa velocidade por longos períodos e precisamos ligá-lo nessa condição durante pouco tempo.

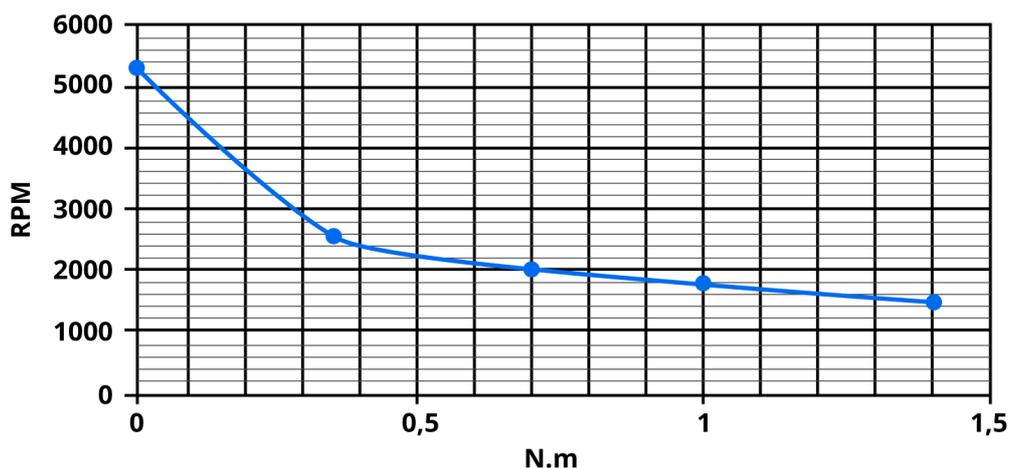
Tabela 1 - Dados do experimento com variação da carga

U (volts)	Torque (N.m)	I (ampères)	Velocidade (RPM)
120	0	0,67	5275
120	0,35	1,54	2560
120	0,7	2	2031
120	1	2,45	1746
120	1,4	2,75	1524

Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

A partir dos dados da Tabela 1, foi gerado um gráfico com o eixo (Y) correspondendo à velocidade em rotações por minuto e com o eixo (X) correspondendo ao torque do motor em Newton-metro, como visto na Figura 29.

Figura 29 - Curva de resposta da velocidade em função do torque



Fonte: Adaptado do livro Máquinas elétricas - Teoria e ensaio, de Geraldo Carvalho

A construção do gráfico permitiu concluir que, ao regular o dinamômetro para o valor de 1,4 (N.m), a leitura da corrente ficou bem próxima à nominal do motor, garantindo que ele atingiu seu limite de torque e de potência.

Mesmo ajustando o dinamômetro para carga zero, existe uma carga aplicada ao motor, por isso ele não dispara e mantém a velocidade limitada em 5275 RPM. Essa carga não foi considerada no ensaio. Contudo, podemos concluir que o motor operando em vazio teve um aumento próximo a 300 % na sua velocidade.

A construção do gráfico permitiu concluir também que, ao ajustar o dinamômetro para o valor de torque de 1,0 (N.m), a regulação de velocidade do motor shunt pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\%reg. = \frac{n(RPM) \text{ sem carga} - n(RPM) \text{ com carga total}}{n(RPM) \text{ com carga total}} \cdot 100$$

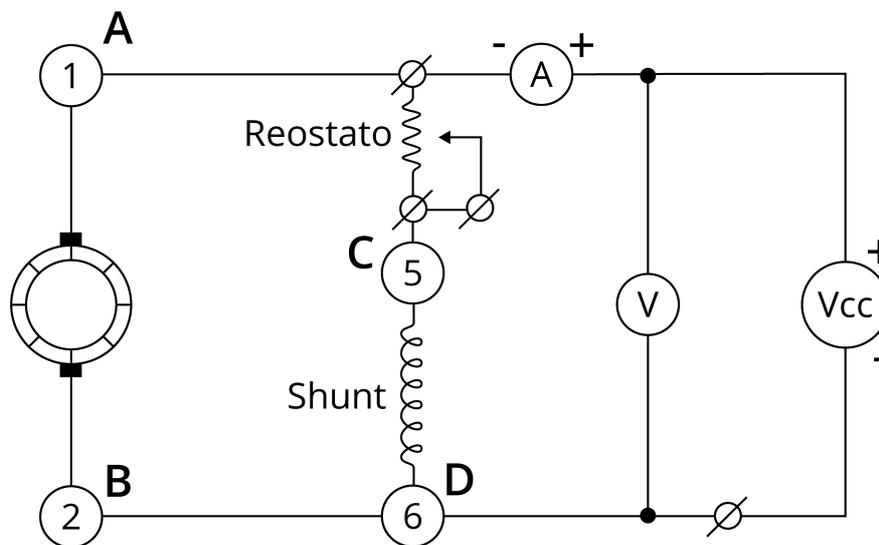
E ficou em: $\%reg. = 202\%$.

4.3 Procedimento do motor *shunt*

As mesmas recomendações do motor série deverão ser adotadas para esse tipo de motor, para garantir a segurança das pessoas que estão executando os ensaios e da máquina.

A ligação deverá ser executada conforme o esquema elétrico da Figura 30. Lembre-se que a fonte de tensão deverá estar inicialmente desligada, o dinamômetro acoplado ao eixo do motor e ajustado para carga zero, e um reostato em série será adicionado com o enrolamento shunt e regulado inicialmente na resistência zero, de forma que não interfira no circuito.

Figura 30 - Esquema elétrico de ligação do motor shunt



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

1º Passo – Ligue a fonte e ajuste lentamente a tensão para 120 Vcc. Observe se o eixo do motor estará girando no sentido correto, caso não esteja, deligue a fonte e inverta a ligação na bobina shunt.

2º Passo – Após a aplicação da tensão, faça a leitura no amperímetro e no voltímetro e meça a rotação no motor com um tacômetro. Ajuste lentamente o reostato para que se obtenha uma rotação aproximada de 1.800 RPM indicada no tacômetro.

3º Passo – Depois de ter executado o passo anterior, repita a mesma ação alterando o dinamômetro para valores intermediários entre 0 (N.m.), 0,35 (N.m), 0,7 (N.m), 1,0 (N.m) e 1,4 (N.m), e construa uma tabela com os valores anotados. Essa tabela deverá ter os valores próximos aos da Tabela 2.

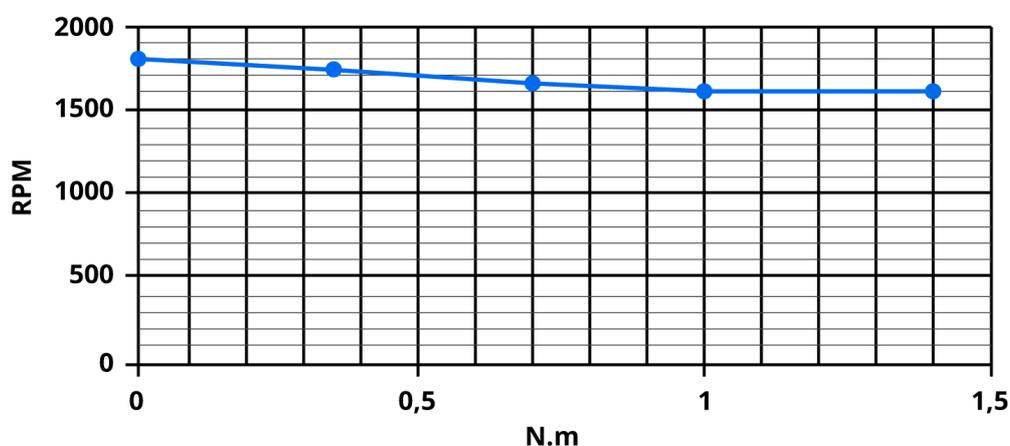
Tabela 2 - Valores de corrente, de tensão e de velocidade com carga variável

U (volts)	Torque (N.m)	I (ampères)	Velocidade (RPM)
120	0	0,35	1800
120	0,35	1,05	1725
120	0,7	1,7	1664
120	1	2,35	1622
120	1,4	2,95	1585

Fonte: - Adaptado de Carvalho (2011).

Após coletar os dados, desligue a fonte e construa um gráfico com os valores coletados, no qual o eixo (Y) corresponderá à velocidade e o (X), ao torque. O gráfico pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Curva de resposta da velocidade em função do torque



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

A construção do gráfico permitiu concluir que, ao ajustar o dinamômetro para o valor de 1,0 (N.m), a regulação de velocidade do motor shunt pode ser feita com a seguinte equação:

$$\%reg. = \frac{n(RPM) \text{ sem carga} - n(RPM) \text{ com carga total}}{n(RPM) \text{ com carga total}} \cdot 100$$

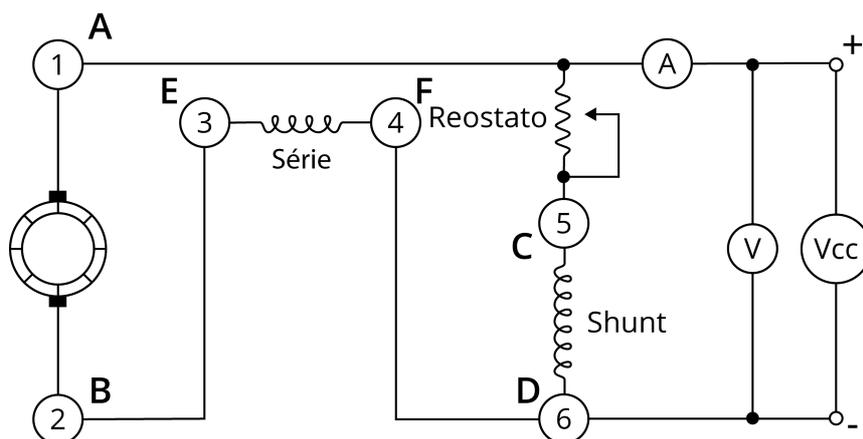
$$\%reg. = 10,9\%$$

Assim, podemos perceber que a velocidade, quando o motor está submetido à plena carga, sofreu uma variação próxima de 10 % de sua velocidade nominal. Para o motor sem carga, por sua vez, a velocidade não ultrapassou a nominal.

4.4 Procedimento do motor *compound*

Os procedimentos relativos ao motor compound serão apresentados em quatro passos, para os quais serão mantidas as mesmas recomendações explicadas para os motores anteriores, a fim de evitar acidentes. A conexão do motor compound é mostrada na Figura 32.

Figura 32 - Esquema elétrico do motor *compound*



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

1º Passo – Para medir o torque e a velocidade na ponta do eixo do motor, serão necessários um dinamômetro e um tacômetro. Mantenha, inicialmente, a fonte desligada e o reostato na posição zero para não interferir no circuito. Como teremos de ligar o motor sempre com carga, precisamos utilizar acoplado a seu eixo um dinamômetro que, a princípio, deverá ser ajustado para o torque zero.

2º Passo - Aumente gradualmente a tensão da fonte cc. Observe inicialmente o sentido de rotação do eixo do motor para que esteja no mesmo sentido do dinamômetro. Caso não esteja, desligue a fonte, inverta a ligação no enrolamento série e volte a ligar a fonte para confirmar o sentido da rotação.

3º Passo - Ligue a fonte cc, ajuste a tensão aplicada lentamente para 120 Vcc. Verifique se a rotação do motor está muito alta (não deve ultrapassar a nominal do motor). Se estiver muito alta, temos a ligação *Compound* diferencial. Desligue a fonte, inverta a ligação do *shunt*, passando para cumulativo, e ligue a fonte novamente ajustando-a lentamente para 120 V.

4º Passo - Observe que os valores indicados no amperímetro e no voltímetro não devem exceder os valores nominais. Meça a rotação no motor com um tacômetro e ajuste lentamente o reostato para que obtenha uma rotação aproximada de 1.800 RPM indicada no tacômetro.

Registre os valores de corrente, tensão e velocidade para a situação de carga demonstrada na Tabela 3. Repita esse registro para outros valores de carga indicados na tabela. Para isso, ajuste no dinamômetro a carga aplicada ao motor, leia a corrente, a tensão e a velocidade e registre.

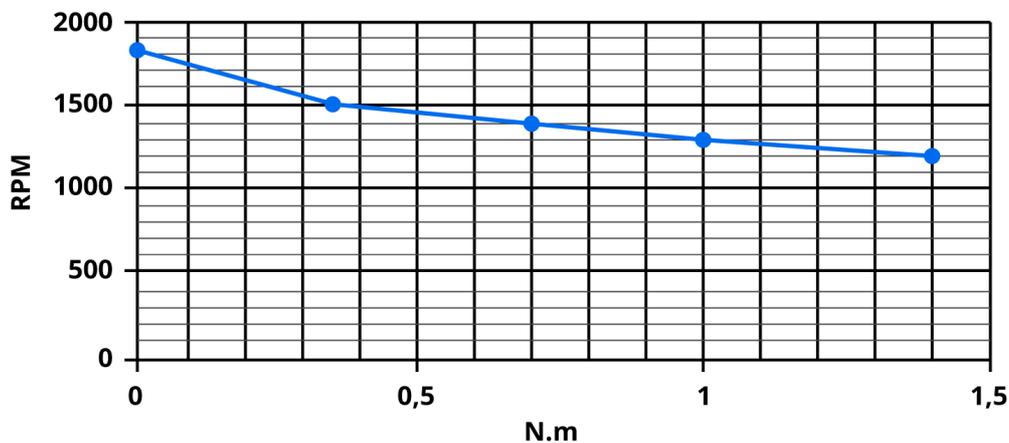
Tabela 3 - Tensão, torque e velocidade

U (volts)	Torque (N.m)	I (ampères)	Velocidade (RPM)
120	0	0,35	1800
120	0,35	0,95	1510
120	0,7	1,42	1400
120	1	1,79	1300
120	1,4	2,2	1210

Fonte: Extraído do livro Máquinas elétricas - Teoria e ensaio, de Geraldo Carvalho

Após coletar os dados, desligue a fonte e construa um gráfico com os valores coletados, no qual o eixo (Y) corresponde à velocidade e o (X), ao torque. O gráfico pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 - Curva de velocidade em função do torque



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

A construção do gráfico permitiu concluir que, ao ajustar o dinamômetro para o valor de 1,0 (N.m), a regulação de velocidade do motor shunt pode ser feita com a seguinte equação:

$$\%reg. = \frac{n(RPM) \text{ sem carga} - n(RPM) \text{ com carga total}}{n(RPM) \text{ com carga total}} \cdot 100$$

$$\%reg. = 38\%.$$

5. Motor de passo

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos. Esses movimentos, por sua vez, geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é girado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência nos seus terminais.

A rotação de tais motores é diretamente relacionada aos impulsos elétricos recebidos, bem como a sequência à qual tais pulsos são aplicados é refletida diretamente na direção em que o motor gira. A velocidade com a qual o rotor gira é dada pela frequência de pulsos recebidos, e o tamanho do ângulo de giro é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados.

Um motor de passo pode ser uma boa escolha sempre que movimentos precisos são necessários. Ele pode ser usado em aplicações nas quais é preciso controlar vários fatores, tais como: ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo.

O ponto forte de um motor de passo não é a sua força (torque) nem a sua capacidade de desenvolver altas velocidades (ao contrário da maioria dos outros motores elétricos), mas sim a possibilidade de controlar seus movimentos de forma precisa. Por conta disso, ele é amplamente usado em impressoras, scanners, robôs, câmeras de vídeo, brinquedos e em automação industrial cujos equipamentos requerem precisão, como visto na Figura 34.

Figura 34 - Exemplos de aplicações de motor de passo



Fonte: KALATEC AUTOMAÇÃO. Disponível em: <http://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2015/12/aplicacao-motor-de-passo-envase.jpg>. Acesso em: 18 de ago. 2017

5.1 Funcionamento de um motor de quatro passos

O funcionamento básico do motor de passo é dado pelo uso de solenoides alinhados dois a dois. Quando esses solenoides são energizados, atraem o rotor, fazendo-o se alinhar com o eixo determinado por eles, causando, assim, uma

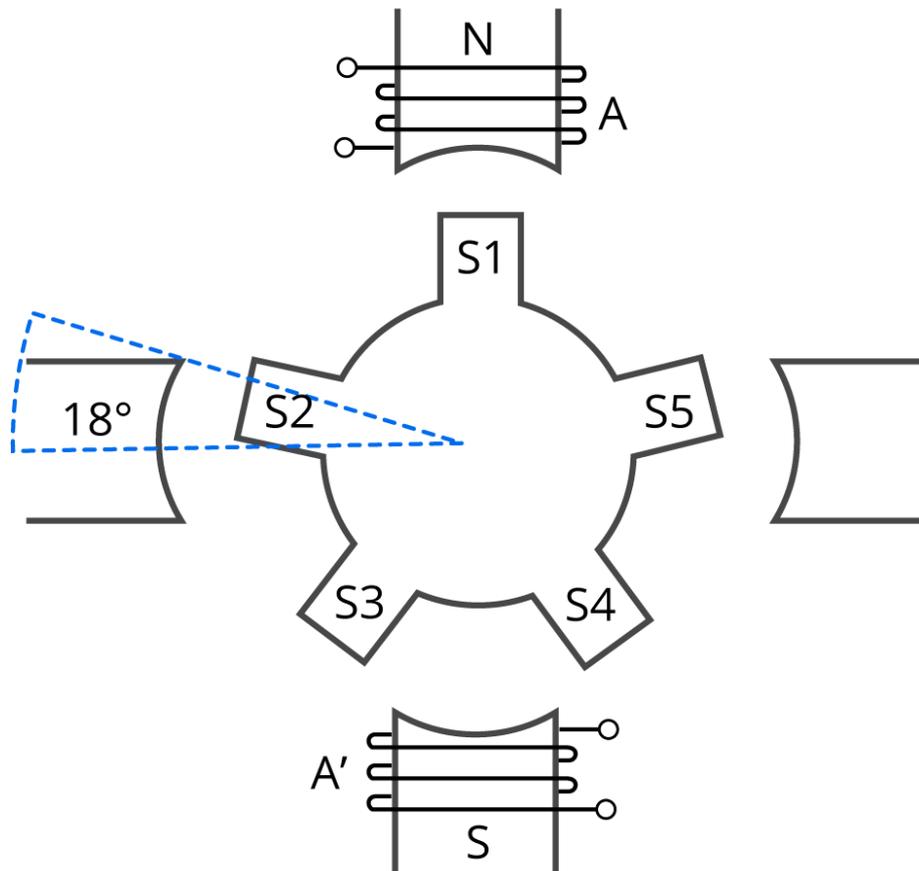
pequena variação de ângulo chamada de passo. Por sua vez, a velocidade e o sentido de movimento são determinados pela forma como cada solenoide é ativado, de acordo com sua ordem e com a velocidade entre cada ativação.

5.2 Determinação do número de passos

O número de passos é dado pelo número de alinhamentos possíveis entre o rotor, representado por uma roda dentada e as bobinas representadas por (A e A'), vistas na Figura 36. Para aumentar o número de passos de um motor, usa-se um maior número de bobina, além do número de polos no rotor (S1, S2, S3, S4, S5, etc.). Tal ideia é vista na estrutura apresentada na Figura 35, na qual é utilizada a representação do rotor alinhando o polo S1 ao campo da bobina (A A').

Assim, é possível observar que o rotor girou cerca de 18° em relação ao seu eixo, em razão de haver 05 (cinco) polos no rotor, o que possibilita uma defasagem de 72° entre cada polo, e também de termos 04 (quatro) solenoides que podem dividir os 72° por 04 e rotacionar o rotor em apenas 18° .

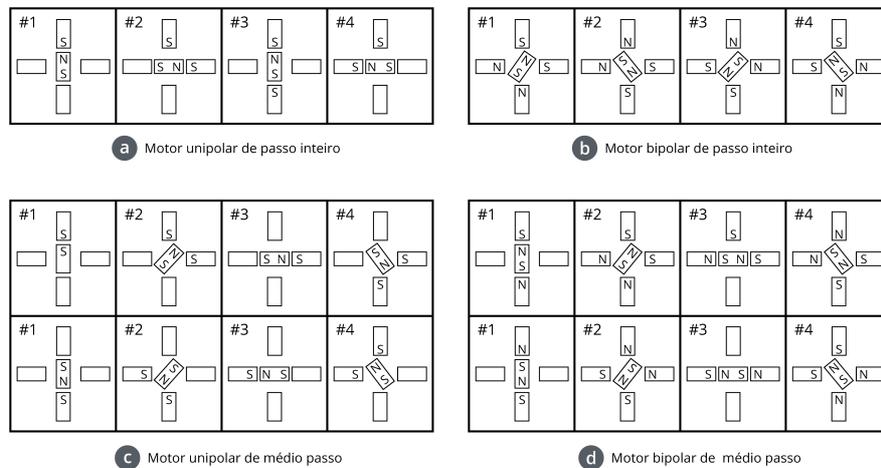
Figura 35 - Motor de passo de cinco passos



A energização de somente uma bobina de cada vez produz um pequeno deslocamento no rotor. Esse deslocamento ocorre simplesmente devido ao fato de o rotor ser magneticamente ativo e a energização das bobinas criar um campo magnético intenso que atua no sentido de se alinhar com os dentes do rotor. Assim, polarizando adequadamente as bobinas, podemos movimentar o rotor entre elas (meio-passo ou *“half-step”*) ou alinhado a elas (passo completo ou *“full-step”*).

A seguir, temos a Figura 36, com os movimentos executados por motores unipolares e bipolares de médio passo e passo inteiro.

Figura 36 - Funcionamento do motor de passo a passo inteiro e de meio passo



Fonte: Autoria própria do SPM (Setor de Produção Multimídia/IMD)

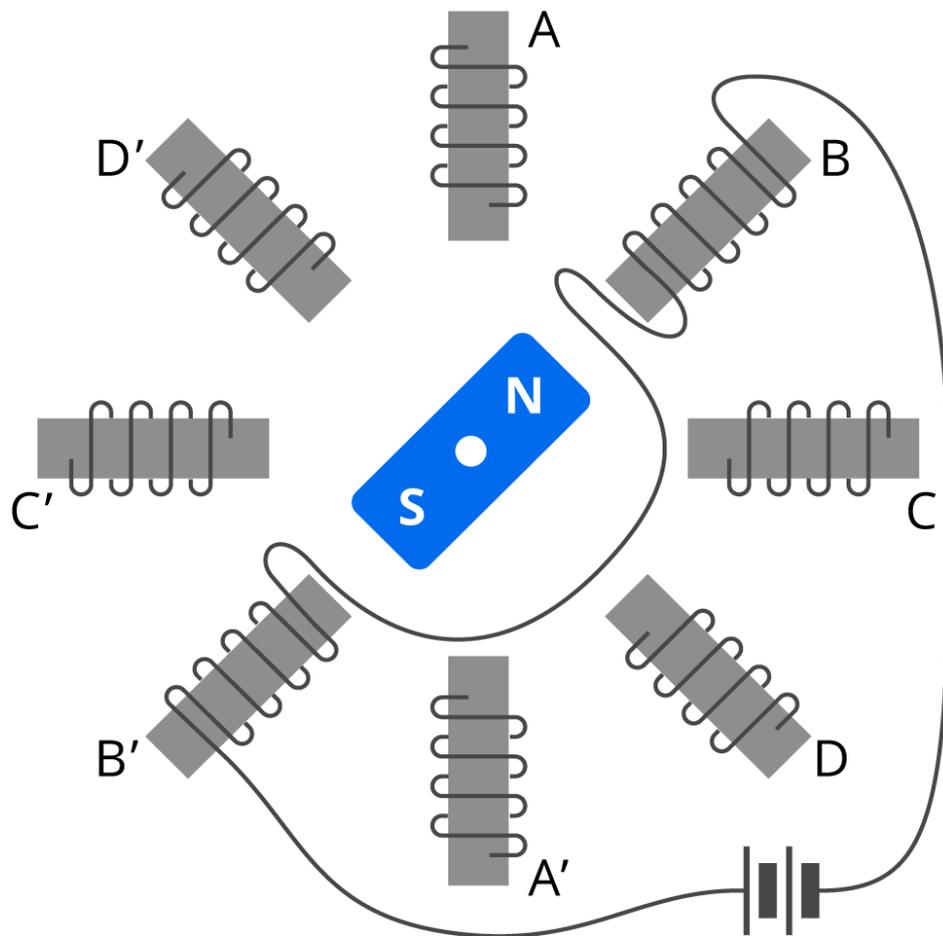
5.3 Tipos de motores de passos

Os motores de passo podem ser classificados de acordo com o projeto do rotor: motor de passos de ímã permanente (se for construído de ímã permanente) e motor de passos de relutância.

5.3.1 Motor de passos de ímã permanente

A presença do ímã permanente equivale a uma excitação da tensão contínua constante no rotor. A ação do ímã permanente é magnetizar cada um dos polos (ou ranhuras) em uma extremidade do rotor, cuja polaridade seja de polo norte, e cada polo na outra extremidade, cuja polaridade seja de polo sul, conforme a Figura 37.

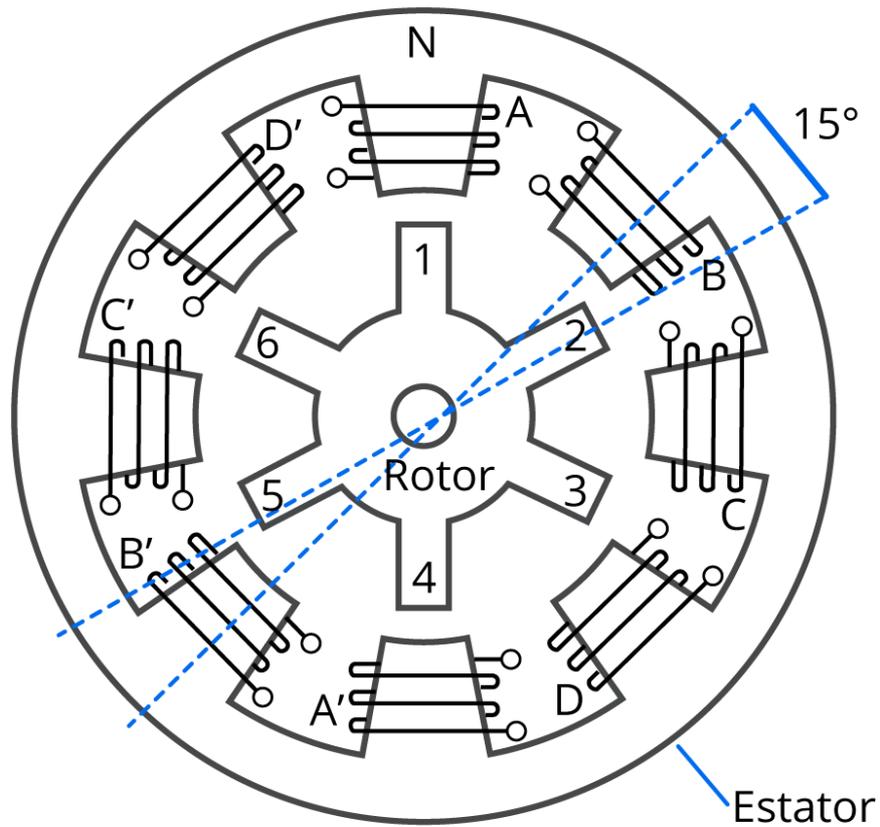
Figura 37 - Motor de passo de rotor com ímã permanente



O ponto de partida está representado na Figura 38 com a bobina energizada "B", devido à corrente contínua produzida. O torque produzido pela ação, gerada pelo ímã, das distribuições de campo do polo do estator e do polo do rotor e dependente da polarização da bobina seguinte A ou C, produzirá um giro no sentido anti-horário ou horário.

O motor de passos de relutância é equipado com um rotor construído a partir de ferro doce. Esse motor desenvolve um torque indexado em resposta à excitação em sequência em corrente contínua das bobinas do estator, devido à grande diferença na relutância magnética que existe entre o percurso de eixo direto e o percurso de eixo de quadratura mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Motor de relutância



5.3.3 Motor de passos híbrido

Comumente encontrado, o motor de passos híbrido é uma mistura dos dois tipos explicados anteriormente. O rotor possui ranhuras e ímãs permanentes. O uso de ímãs permanentes combinados a uma geometria de relutância variável pode aumentar significativamente a exatidão no posicionamento do seu eixo e do seu torque.

5.4 Principais parâmetros do motor de passos

Existem alguns parâmetros que devem ser considerados para projetar melhor o motor de passo, tais como:

- **Passo angular:** rotação do eixo durante um passo;
- **Momento (torque):** efeito rotativo de uma força, para o qual é feita a medição a partir do produto da força pela distância perpendicular até o ponto em que ela atua partindo de sua linha de ação;
- **Momento de inércia:** medida da resistência mecânica oferecida por um corpo à aceleração angular.

É com esse interessante conteúdo sobre motor de passo que encerramos a nossa segunda aula. Tudo bem até aqui? Caso não tenham compreendido algo no decorrer da aula, fiquem à vontade para usar o fórum e expor suas dúvidas! Estaremos sempre à disposição para discutir cada ponto levantado e melhorar o entendimento de vocês! Até a próxima!



Leitura complementar

- CARVALHO, Geraldo. **Livro de máquinas elétricas:** teoria e ensaios. São Paulo: Editora Érica, 2011.
- UMANS, Stephen D.; KINGSLEY JÚNIOR, Charles; FITZGERALD, A. E. **Máquinas elétricas com introdução:** a eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2006.



Resumo

Nesta aula, vimos os motores de corrente contínua, suas partes físicas, seu princípio de funcionamento e suas diferentes formas de ligação. Também estudamos a maneira como variar a rotação do seu eixo. Por fim, vimos os motores de passo, com a descrição dos vários tipos, as características de funcionamento e os parâmetros necessários para projetá-lo.



Atividade 03

1. Descreva o funcionamento de motor de passo.
2. Qual a diferença entre o motor de passo e o de médio passo?
3. Qual é a área de aplicação do motor de passo?



Referências

NASCIMENTO JUNIOR, G. C. **Máquinas elétricas:** teoria e ensaios. São Paulo: Editora Érica LTD, 2011.